Les mécanismes cognitifs d'apprentissage

Anh Nguyen-Xuan

Après un bref rappel historique, les trois principaux mécanismes d'apprentissage sont présentés dans le cadre de l'approche « traitement de l'information ». Le premier mécanisme concerne l'apprentissage des concepts à partir des exemples de concepts, le deuxième mécanisme concerne l'apprentissage des connaissances procédurale par la résolution des problèmes, le troisième mécanisme concerne l'apprentissage par analogie. Une discussion est présentée qui tente d'apporter quelques éléments de réflexion sur des questions telles que : l'apprentissage d'un nouveau domaine de connaissance, les différences entre les novices et les experts, la généralisation d'une connaissance apprise.

INTRODUCTION

Le pharmacien apprend à se servir du Minitel pour passer ses commandes ; Marie va apprendre la Géométrie en 4ème ; Paul a appris à piloter un planeur ; un médecin débutant a devant lui un long apprentissage avant de savoir faire des diagnostics sûrs ; Jean n'aura pas de difficulté à apprendre le Portugais, il connaît déjà plusieurs langues dont l'Italien et l'Espagnol. Le bon sens commun nous suggère que l'activité « apprendre » est un phénomène quasi-permanent, et qui concerne tous les niveaux de fonctionnement du système humain : moteur, perceptif, mental...

Tous ces phénomènes que le langage quotidien semble ranger dans une même catégorie d'activité mentale « apprendre » sont-ils explicables par un *mécanisme unique et universel* ; ou bien, faut-il, au contraire, en supposer un grand nombre ? Qu'il s'agisse d'un seul et unique mécanisme ou qu'il s'agisse de mécanismes diversifiés, leur compréhension permet d'apporter une réponse à des questions d'intérêt pédagogique évidente, telles que : Comment apprend-on un nouveau domaine de connaissance, comment passe-t-on de l'état de novice à l'état d'expert d'un domaine donné, devenir expert d'un domaine rend-il un individu plus apte à devenir expert d'un autre domaine... On peut identifier deux grande approches dans les recherches expérimentales sur l'apprentissage : l'approche associationniste née au début du siècle, et l'approche traitement de l'information symbolique, plus récente.

HISTOIRE A GRANDS TRAITS

Les premières recherches en psychologie expérimentale sur le thème de « l'apprentissage » remontent aux travaux du physiologiste russe Pavlov qui découvrait le « réflexe conditionné » chez le chien, en 1903. Voici un exemple d'expérience de conditionnement. La salivation est un réflexe qui est déclenché en présence d'une boulette de viande ; par contre, le chien ne salive pas au bruit d'un son de cloche. La viande est un « stimulus inconditionnel », ce stimulus suscite une réponse R, la salivation. On présente alors au chien une suite de couples d'événements : son de cloche et apparition de la viande. Le chien salive naturellement à cause de la présence de la viande. Au bout d'un certain temps de cet entraînement, on présente le son de cloche sans la viande : le chien salive. Le son de cloche a acquis un statut de stimulus déclenchant le réflexe de salivation, on l'appelle « stimulus conditionnel ». Le chien a ainsi appris à **associer** une réponse R à un stimulus S qui ne provoquait pas cette réponse auparavant. Les travaux de Pavlov sont d'ailleurs à l'origine de la révolution « comportementaliste », couramment appelé « le behaviorisme », lancé par l'Américain Watson en 1913, qui devenait alors le courant dominant de la psychologie scientifique américaine. Le behaviorisme rejette toute référence aux processus mentaux parce qu'ils ne sont pas observables.

Dans la même période (en fait dès 1889) le psychologue américain Thorndike, travaillant sur des rats dans des situations d'apprentissage différentes de celles de Pavlov, en arrivait aussi à proposer le mécanisme d'association S-R comme le mécanisme fondamental de sa théorie de l'apprentissage désigné sous le nom de « connectionisme ». Thorndike introduisait des concepts importants tels que le « renforcement » (l'association entre un stimulus et une réponse est renforcée par des récompenses), ou le « transfert » (avoir appris une habileté H permet de raccourcir le temps d'entraînement nécessaire à l'acquisition d'une habileté proche H').

Le paradigme de base des expériences d'apprentissage associationniste est l'apprentissage « discriminatif ». En voici un exemple chez les pigeons dont on sait qu'ils picorent lorsqu'ils sont affamés. Un pigeon affamé est mis dans une boîte dont le plancher comporte deux cercles, un rouge et un vert. Lorsque le pigeon picore le cercle rouge, il reçoit un grain. Le grain reçu joue le rôle de renforcement de l'association entre le picorage et le cercle rouge. Le pigeon apprend très vite à picorer le cercle rouge : il a discriminé entre les deux couleurs.

Bien qu'elles ne fussent pas les seules théories psychologiques de l'apprentissage, les théories du courant associationniste avaient dominé la psychologie expérimentale jusqu'à la fin des années 60. L'essor de l'approche « traitement de l'information symbolique », dont Miller, Galanter et Pribram (1960), de l'Université de Harvard, Newell et Simon (1972), de l'Université Carnegie-Mellon, sont parmi les pionniers, avait alors pour résultat un certain désintérêt des chercheurs pour la théorie associationniste. L'approche « traitement de l'information symbolique » est basée sur l'idée essentielle que la pensée consiste en manipulations de « symboles mentaux ». Un symbole mental est une représentation mentale d'un objet, d'un état du monde externe ; « manipuler » consiste à comparer, réarranger, ajouter, enlever... Cette approche fait partie du courant dit « cognitiviste » parce qu'il s'intéresse aux activités mentales complexes telles que le raisonnement et la résolution de problèmes. Notons que si le courant cognitiviste était nouveau outre-Atlantique au début des années 60, il était déjà fort ancien en Europe : l'une des figures remarquables en était le suisse Piaget, dont les premières publications en psychologie remontent à 1921. Le cognitivisme s'oppose au behaviorisme en ce qu'il considère que la psychologie doive chercher à expliquer les comportements par des activités mentales internes, et non pas se contenter de faire des constructions dont les briques de base se réduisent à des associations S-R.

L'approche cognitiviste s'intéresse à des situations d'acquisition de connaissances dans lesquelles on doit supposer de la part de l'apprenant des activités de raisonnement complexes et tendant vers un but explicite. L'outil de formalisation préféré des chercheurs de cette approche est la modélisation informatique qui représente les connaissances sous formes de règles d'inférence et de réseau de concepts. Une règle d'inférence est une connaissance qui permet de produire des informations à partir d'autres informations. Par exemple, si j'ai la règle « si une personne est âgée de moins de 12 ans, alors cette personne va à l'école » et si l'on me dit que « Marie a 11 ans », je peux inférer (à tort ou à raison) que Marie va à

l'école, sans qu'on me le dise. Un réseau de concepts est un ensemble de représentations des objets reliées entre eux par des relations. Le terme « objet » ici a un sens général, un objet peut être une situation, une idée abstraite. Par exemple, pour interpréter la règle d'inférence ci-dessus, je dois utiliser la connaissance que j'ai sur les relations entre les nombres : le concept « *nombre-12* » est lié au concept « *nombre-11* » par diverses relations, dont les relations « moins que » et « plus que ».

Pour conclure cette historique brossée à grands traits, on peut dire que, actuellement, la différence essentielle entre l'approche traitement de l'information symbolique et l'approche associationniste est que la première postule que la production du comportement observable R consécutif au stimulus observable S, est le résultat des opérations mentales (telles que « comparer », « inférer »...) effectuées sur des représentations de S ; alors que la seconde cherche à décrire la production de R en termes de force d'association des liens entre une configuration de stimuli simples qui composent S et une configuration de réponses simples qui composent R. Notons cependant que de tout récents travaux expérimentaux et de travaux de modélisation des processus d'apprentissage de tâches complexes montrent que les deux approches sont plus complémentaires qu'antagonistes (cf., par exemple, Lamberts, 1990).

L'APPROCHE TRAITEMENT DE L'INFORMATION : QUELQUES CONCEPTS DE BASE

Les mécanismes d'apprentissage que nous examinerons dans cet article sont vus selon le point de vue de l'approche du traitement de l'information symbolique. Nous allons, auparavant dire un mot des notions « connaissance déclarative » et « connaissance procédurale ».

On distingue couramment (en psychologie cognitive, en I.A., en neuro-science, en linguistique...) deux types de connaissances. Les connaissances « déclaratives » concernent le « savoir quoi » : c'est un savoir sur les états et les lois du monde (ou d'un domaine de connaissance donné). On les oppose aux connaissances « procédurales » qui concernent le savoir-faire, ou le « savoir comment ». Par exemple, dans le domaine de la géométrie plane, un élève de 4ème peut connaître très bien tous les théorèmes du programme de géométrie de 4ème sans savoir forcément résoudre un problème de démonstration en géométrie. La connaissance des théorèmes est une connaissance déclarative, l'habilité à résoudre des problèmes de démonstration est une connaissance procédurale. Nous verrons trois mécanismes d'apprentissage : apprentissage de concepts, apprentissage d'habiletés procédurales, apprentissage par analogie.

Dialogue :
Expérimentateur : Connais-tu beaucoup de chiens ?
Enfant : *Oh oui, Gretchen et Bingo et Taco*
Exp. : Est-ce que Bingo aboie ?
Enf. : Bien sûr, tu es bête, Bingo est un chien, *oui ou non* ?
Exp. : J'ai une chienne qui s'appelle Palov, est-ce qu'elle aboie ?
Enf. : Tu veux dire quand elle est furieuse ou quand elle a faim? Bien sûr !
Exp. : De tes chiens, quel est le plus petit quel est le plus grand chien ?
Enf. : Eh ben, Gretchen est plus grande que moi, vraiment grande,
et Taco est tout petit, je peux le prendre sur mes genoux.
Exp. : Mais tu as dit que les chiens c'est grand « comme ça ».
Enf. : Et ben, oui, les chiens, c'est grand « comme ça »,
mais Gretchen est plus grande, et Taco est plus petit.

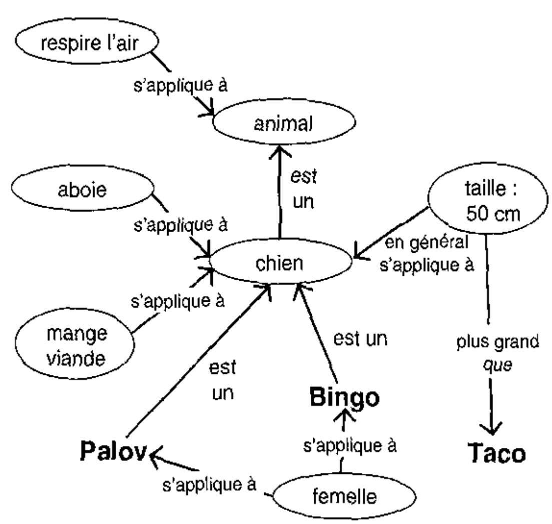


Figure 1 : Représentation d'une partie de la connaissance d'un enfant sur le concept « chien », d'après le dialogue au-dessus (d'après Lindsay & Norman).

La connaissance déclarative la plus fondamentale est celle concernant les concepts. Un concept est un symbole qui représente une classe d'objets (concrets ou abstraits) qui possèdent des propriétés communes. Par exemple, le concept « bateau » représente une multitudes d'objets qui, tout en n'étant pas identiques, possèdent un certain nombre de propriétés communes, telles que flottant sur l'eau, présentant une forme concave. Notons que pratiquement tous les mots du langage peuvent acquérir le statut de concept ; par contre, beaucoup de concepts n'ont pas de mots pour les désigner. Par ailleurs, les concepts sont organisés en des réseaux de relations. Par exemple, pour un adulte, le concept « chien » est relié au concept « mammifère » par la relation « est un exemplaire de » : un chien est un mammifère. Nous présentons dans la Figure 1 une représentation de la connaissance d'un enfant sur le concept « chien ».

L'ACQUISITION DES CONCEPTS

L'acquisition des concepts est primordiale à toute acquisition, car ils constituent les outils cognitifs les plus importants avec lesquels l'individu organise (donc perçoit) le monde. Nous allons maintenant en présenter deux mécanismes sous-jacents, tout en rappelant qu'un « mécanisme » n'est pas un comportement observable mais une construction théorique étayée par des données d'observation. Et la modélisation est une démarche permettant d'articuler les différents mécanismes qu'on évoque pour expliquer les diverses caractéristiques des phénomènes observés (Nguyen-Xuan & Grumbach, 1988).

La majorité des expériences d'apprentissage de concepts utilise le paradigme de l'apprentissage discriminatif présenté ci-dessus. Il constitue le lien de continuité entre l'approche associationniste et l'approche traitement de l'information symbolique. Cette situation d'apprentissage continue à être la plus étudiée, nous lui consacrerons donc un plus grande place que pour les autres paradigmes. D'ailleurs, certains résultats obtenus dans ces situations expérimentales peuvent être mieux « expliqués » par un modèle de type associatif qu'un modèle basé sur les manipulations de représentations symboliques. Bruner, Goodnow et Austin (1956), de l'Université de Harvard, ont été parmi les premiers psychologues à étudier (dès les années 50) l'apprentissage des concepts dans la perspective cognitiviste.

La situation d'apprentissage de concepts la plus fréquemment utilisée est la suivante : l'expérimentateur choisit un concept, un ensemble d'objets qui sont des exemples du concept (des « exemples positifs »), et un ensemble d'objets qui ne sont pas des exemples du concept (des « exemples négatifs »). Par exemple, si le concept qu'on veut faire apprendre est « véhicule à moteur », des photos représentant une automobile, une motocyclette, sont des exemples positifs du concept ; des photos représentant un vélo, une charrette conduite par des chevaux... sont des exemples négatifs. L'expérimentateur présente au sujet un exemple positif (e.g. la photo d'une automobile), en lui disant que l'objet représenté est un exemple du concept, sans évidemment dire quel est ce concept. Le sujet choisit ensuite parmi un tas de photos devant lui une photo représentant un objet et dit à l'expérimentateur si, selon lui, il s'agit d'un exemple positif ou bien s'il s'agit d'un exemple négatif du concept. L'expérimentateur lui dit alors s'il a fait un jugement correct ou non. Le sujet fait ainsi une succession d'essais. Le but à atteindre pour le sujet est d'arriver à ranger correctement l'ensemble des photos en deux tas : un tas d'exemples du concept et un tas qui ne comporte pas d'exemples du concept. Comment le sujet s'y prend-il pour y arriver ?

Dans l'apprentissage des concepts, on oppose en général deux principaux mécanismes, « l'induction de règle » et « la démarche basée sur la similarité ».

Pour présenter un exemple du mécanisme d'induction de règle, nous empruntons un matériel utilisé par Marvin Levine (1975) de l'Université de l'Etat de New York (cf. Figure 2). Une règle est une description des propriétés du concept telle que cette description est vraie pour tous les exemples du concept et fausse pour tous les objets qui ne sont pas des exemples du concept.

Le matériel expérimental est constitué par un ensemble de cartes portant une lettre T et une lettre X. Une lettre peut être blanche ou noire, grande ou petite, être à gauche ou être à droite par rapport à l'autre lettre. Prenons le cas d'apprentissage de concept très simple où l'ensemble des propriétés communes à tous les exemples positifs d'un concept se réduit à une seule des

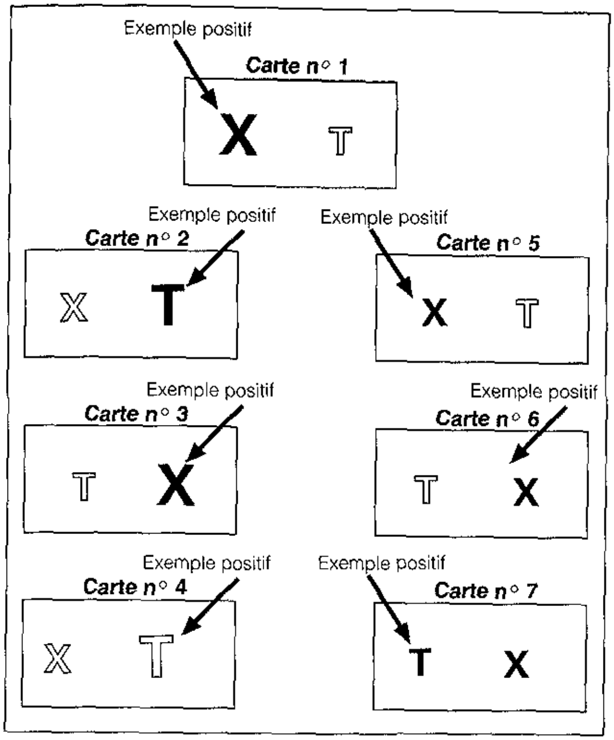


Figure 2 : les cartes de Levine pour une expérience d'apprentissage de concepts.

8 caractéristiques : blanc, noir, grand, petit, gauche, droite, X, T. On a 32 combinaisons possibles, donc 32 cartes différentes. Supposons que le concept que l'expérimentateur veut faire découvrir est « noir », et que le sujet est informé que le concept est l'une des huit caractéristiques. Ainsi, au départ, le nombre des hypothèses possibles est de 8.

L'expérimentateur montre au sujet la carte n° 1 et désigne la lettre X comme un exemple positif du concept (cf. figure 2). Le sujet doit choisir une carte parmi le reste des cartes et désigner l'une des deux lettres comme exemple positif du concept, l'expérimentateur informe alors le sujet si son choix est correct ou non. Dans la carte n° 1, l'information selon laquelle la lettre X est un exemple du concept réduit l'ensemble des hypothèses de 8 à 4, ce sont « grand », « X », « noir », « gauche ». Supposons que le sujet fait l'hypothèse que la règle est « grand ». Il va tester son hypothèse en désignant une lettre dans une carte qu'il choisit parmi les cartes restantes. Le choix que va faire le sujet dépend de sa stratégie de test d'hypothèse. Bruner et ses collègues ont trouvé deux principales stratégies de test d'hypothèses.

L'une des stratégies consiste à chercher à confirmer son hypothèse : le sujet choisit un exemple cohérent avec son hypothèse. Par exemple la lettre T de la carte n° 2. La réponse de l'expérimentateur est « le choix est correct ». L'information fournie par l'expérimentateur au choix de T sur la carte n° 2 n'infirme pas l'hypothèse du sujet, il garde donc son hypothèse et choisit un autre exemple qui la confirme. Logiquement, il reste deux hypothèses possibles : « grand » et « noir » : tant que le sujet choisit une lettre caractérisée par la conjonction des deux caractéristiques « grand » et « noir », par exemple la carte n° 3, il reçoit l'information « c'est correct ». Or 14 sur les 32 cartes portent au moins une lettre grande et noire. Il peut donc arriver que le sujet garde l'hypothèse « grand » durant 14 essais. Si le sujet choisit une carte autre que l'une de ces 14 cartes, par exemple la lettre T de carte n° 4, l'information sera « c'est incorrect ». C'est seulement là que le sujet va changer son hypothèse...

La deuxième stratégie de test d'hypothèse consiste à chercher à infirmer son hypothèse et à réduire systématiquement le nombre d'hypothèses possibles. Si le sujet adopte l'hypothèse « grand », il va considérer une carte qui a les mêmes caractéristiques que la première, sauf celle concernant son hypothèse, i.e. la taille de X. Il choisit donc la carte n° 5 et désigne la lettre X. Si l'information donnée par l'expérimentateur est « c'est incorrect », l'hypothèse « grand » est la seule possible. Si la réponse est « c'est correct », le sujet peut éliminer le caractère « taille », car la taille n'est pas la même dans les deux exemples positifs. Les hypothèses possibles sont « X », « noir », « gauche ». Supposons que le sujet fait l'hypothèse que la règle est « gauche ». Le deuxième choix du sujet sera une carte ayant les mêmes caractéristiques que la carte n° 5 sauf la position de X : la carte n° 6 sur laquelle il désigne la lettre X. Si l'information est « c'est incorrect », la seule hypothèse possible est « gauche ». Si elle est « c'est correct », le caractère « position » est éliminé, il reste les hypothèses possibles « X » et « noir ». Si le sujet fait hypothèse que la règle est « X », il va choisir une carte portant un T noir, par exemple la carte n° 7, et désigne la lettre T. Si l'information est « c'est incorrect », alors l'hypo-

thèse « X » est la seule possible, si elle est « c'est correct », alors le nombre des hypothèses possibles se réduit à un : « noir ». Cette stratégie permet de trouver le concept correct avec un maximun de 3 essais.

En résumé, l'induction de règle est un processus de traitement de l'information comportant trois étapes : (i) génération d'hypothèse : construire une description ; (ii) test de l'hypothèse sur un nouvel objet ; (iii) réajustement de l'hypothèse en utilisant l'information obtenue par la réponse de l'expérimentateur.

Dans le cas d'apprentissage de concepts simples, la première stratégie de test d'hypothèse est observée chez les enfants ; les adultes emploient plus fréquemment la deuxième stratégie, plus efficace. Mais peu d'adultes l'utilisent lorsqu'il s'agit de découvrir des concepts complexes définis par une conjonction de plusieurs propriétés (par exemple : « X-grand & X-blanc & X-gauche »), car cette stratégie nécessite (comme le montre notre exemple) un raisonnement combinatoire qui devient plus difficile à manier dans le cas de concepts complexes.

La question qui se pose est alors la suivante. Les concepts que les gens apprennent dans la vie réelle sont en général des concepts complexes, et il existe des concepts pour lesquels il n'est pas possible de trouver des propriétés permettant d'en délimiter les frontières, par exemple : un tapis est-il un meuble ? De plus, ces concepts de la vie courante sont appris sans grand effort. La démarche d'induction de règle est-elle alors vraisemblable hors des situations de laboratoire ? En tout cas, serait-elle le seul mécanisme d'appentissage des concepts ? En réponse à cette question, d'autres mécanismes ont été proposés, dont « la démarche basée sur la similarité » de Medin de l'Université de l'Illinois (cf., par exemple, Nosofski, 1984). Dans cette démarche, le sujet mémorise les exemples positifs d'un concept et classe un nouvel objet rencontré comme exemple du concept sur la base de la similarité entre ce nouvel objet et les exemples connus du concepts.

Comment les exemples sont-ils mémorisés, quel est le mécanisme qui permet d'évaluer le degré de similarité entre un ensemble d'objets stockés en mémoire et un nouvel objet ? Il existe plusieurs théories sur l'organisation de la mémoire, et par conséquence plusieurs façons de définir une mesure de similarité. Nous ne pouvons pas les présenter ici. Notons seulement que les modèles qui simulent avec succès le mécanisme de similarité sont ceux basés sur les concepts associationnistes de renforcement et de modification du poids des liens entre une configuration de stimuli et une configuration de réponses (Estes, 1985, Gluck & Bower, 1988).

Peut-on alors dire, en conclusion de cette partie sur l'apprentissage des concepts, qu'il est possible de faire l'économie du mécanisme d'induction de règles, puisque le modèle de similarité semble mieux rendre compte des situations d'apprentissage dans la vie réelle ? La réponse est qu'on a besoin des deux types de mécanismes, la mise œuvre chez le sujet de l'un ou l'autre des deux mécanismes dépend de plusieurs facteurs, nous en citons deux. Le premier facteur concerne « la charge cognitive », qui a été mis en évidence par Smith et Shapiro (1989) : les sujets utilisent majoritairement la démarche d'induction de règle s'il a pour seule tâche d'apprendre un concept ; mais la démarche basée sur la similarité est majoritaire si le sujet doit, en même temps, effectuer une tâche de soustraction simple (la charge cognitive est donc plus importante). Le deuxième facteur concerne la nature du concept à apprendre. Par exemple, Mathews et al. (1989) montrent que la démarche basée sur la similarité est inefficace lorsqu'il faut découvrir des concepts qui sont des règles logiques.

L'ACQUISITION DES CONNAISSANCES PROCEDURALES

L'acquisition des connaissances procédurales est un thème de recherche beaucoup moins exploré. Ce thème de recherche est issu des travaux sur la résolution de problèmes étudiés par l'approche traitement de l'information symbolique. Une connaissance procédurale est un savoir-faire, elle sert à produire un résultat. Une connaissance procédurale est donc forcément une connaissance spécifique à une classe restreinte de situations. Par exemple, la connaissance des axiomes et théorèmes de la géométrie est une connaissance déclarative générale à tout le domaine de la géométrie. Par contre, savoir construire des figures à partir des énoncés de problème est un savoir procédural limité à la classe de problèmes de construction des figures, ce savoir ne permet par de résoudre les problèmes de démonstration.

Cependant, la connaissance de certains théorèmes (donc des connaissances déclaratives) est nécessaire pour mettre au point des méthodes de construction de figure. Par exemple, le théorème des milieux « la droite qui passe par les milieux des deux côtés d'un triangle est parallèle au troisième côté » permet de trouver une façon de tracer deux droites parallèles.

John Anderson, de l'Université de Carnegie-Mellon, a mené, avec son équipe, depuis 1975, diverses expériences sur l'apprentissage des connaissances procédurales, notamment apprendre à programmer, apprendre à résoudre des problèmes de géométrie, apprendre à utiliser un traitement de texte (Anderson, 1983, Singley & Anderson, 1989). Il a montré tout d'abord qu'une connaissance procédurale s'acquiert par l'exercice : pour apprendre à programmer, il ne suffit pas d'étudier des programmes achevés et bien faits, il faut programmer. Nous savons que pour jouer aux échecs, par exemple, il ne suffit pas de lire des traités sur les échecs, il faut chercher à résoudre soi-même des problèmes d'échec. Autrement dit, tout apprentissage de connaissance procédurale doit être un apprentissage par la résolution de problèmes (Nguyen-Xuan, 1991).

Anderson a montré aussi que toute acquisition de connaissance procédurale comporte trois étapes. La première étape consiste à acquérir des connaissances déclaratives du domaine. La deuxième étape consiste à utiliser ces connaissances déclaratives pour guider la recherche de la solution des problèmes. La troisième étape est celle où le sujet a acquis un savoir-faire qui devient autonome. Comment le sujet s'y prend-il pour utiliser les connaissances déclaratives afin d'atteindre le but d'un problème ? Que veut dire un savoir-faire qui a pour origine des connaissances déclaratives et qui est devenu autonome ?

Prenons l'exemple de la construction des figures géométriques (Anderson a étudié en fait l'apprentissage de la démonstration en géométrie, mais ce cas est trop compliqué pour l'exposer en peu de mots). Supposons qu'un élève doit construire deux droites parallèles, avec une règle et un compas, et qu'il n'a jamais fait une telle construction. Pour utiliser ses connaissances déclaratives dans le domaine de la géométrie, l'élève met en œuvre des connaissances générales qui n'appartiennent pas qu'au domaine de la géométrie : une méthode de raisonnement et une règle générale « si je veux atteindre un but B et que j'ai une connaissance déclarative D qui mentionne B, alors j'essaie d'utiliser D ».

– Le théorème des milieux cité plus haut mentionne des droites parallèles, il peut donc être utile. Ce théorème mentionne comme condition préalable l'existence d'un triangle, puis la détermination des milieux de deux segments.

– Pour construire un triangle, cela ne pose pas de problème. Mais l'élève ne sait pas comment déterminer avec précision le milieu d'un segment. Il a cependant la connaissance déclarative « le centre d'un cercle est le mileu de ses diamètres » qui suggère une façon de construire des segments portant un point matériel (le centre du cercle) correspondant à leur milieu. Cette façon de faire est utilisable si l'on n'a pas la contrainte que le triangle est déjà déterminé. Pour le problème actuel (où aucun triangle n'est imposé au préalable) cette contrainte n'existe pas.

– Le théorème mentionne deux milieux de deux segments, on a donc besoin de deux cercles. La question est alors : comment placer ces cercles, doivent-ils être égaux, ou doivent-ils être inégaux. D'autres connaissances déclaratives du domaine sont alors utilisées pour répondre à ces questions...

On note que le raisonnement décrit ci-dessus a conduit l'élève à ne pas traduire pas à pas le *théorème des milieux* en traçant le triangle d'abord et chercher ensuite à déterminer les milieux ; que ce raisonnement consiste à partir du but qu'il veux atteindre et trouver quels sont les buts intermédiaires qu'il faut satisfaire, et les moyens d'y arriver.

L'élève a résolu le problème de construction de deux droites parallèles. S'il fait souvent des constructions de figures géométriques, il aura mis au points un *certain nombres de procédures de* construction pour des cas de construction qui ont des contraintes différentes. S'il utilise souvent ces procédures, elles deviennent autonomes des théorèmes sur lesquels il s'est basé pour les construire, c'est-à-dire qu'il n'a plus besoin de conduire le raisonnement ci-dessus chaque fois qu'il veut construire deux droites parallèles. Il peut même oublier les raisonnements qui lui ont permis de mettre au point ses procédures.

Ainsi, une pratique intensive a souvent pour résultat la construction des connaissances com-

pactées, que les psychologues appellent des « chunks ». Par exemple, une personne qui a l'habitude de porter une cravate possède une connaissance compactée qui lui permet de faire un nœud de cravate en pensant à autre chose ; mais la contre-partie est souvent l'impossibilité pour cette personne de décrire verbalement la suite des mouvements composant la procédure. Par contre, un novice doit réfléchir à chaque geste en termes de « pour amener ce bout ici, il faut faire comme ça ».

Pour conclure, nous voudrions ajouter ceci : si l'apprentissage d'une connaissance procédurale d'un domaine a pour condition préalable l'acquisition des connaissances déclaratives, il existe des connaissances déclaratives qui ne peuvent être acquises sans que la personne ait acquise une certaine expertise pour des connaissances procédurales du domaine. C'est par exemple le cas des « heuristiques » qui sont des connaissances sur les connaissances déclaratives qui permettent de mieux les utiliser. Par exemple, pour la géométrie, la connaissance heuristique « pour les cas où l'on doit démontrer que trois points sont alignés, les théorèmes sur les droites parallèles et sur les droites perpendiculaires sont souvent utiles » indique une direction prometteuse pour la recherche d'une démonstration.

LA CRÉATION DES CONNAISSANCES PAR ANALOGIE

Le dernier mécanisme que nous évoquons est la création des connaissances par analogie. Les recherches en Psychologie Cognitive sur le thème de l'apprentissage par analogie ont pris un grand essor seulement depuis la fin des années 70 (cf., par exemple, Goswami, 1990, Nguyen-Xuan, 1990a). L'idée de base en est qu'une connaissance nouvelle (qu'on peut appeler l'objet cible ou le domaine cible) peut être apprise en l'assimilant à une connaissance que le sujet possède déjà (qu'on peut appeler objet source ou domaine source). L'objet cible est appréhendé à partir d'une des structures de relations qui caractérise l'objet source. Cette appréhension consiste à raisonner, faire des inférences dans le domaine source et transférer les résultats obtenus dans le domaine cible. C'est une méthode d'enseignement couramment adoptée à l'école. Par exemple : l'analogie entre les parts d'un gâteau (le domaine source) et les fractions (domaine cible). Pourquoi 1/4 + 1/4 donne 1/2 ? C'est comme si l'on ajoute un quart d'un gâteau à un quart d'un gâteau : on obtient la moitié d'un gâteau.

Mais il ne faut pas oublier qu'il n'y a jamais identité stricte entre deux domaines. Dans le cas où l'on veut aider l'élève à se donner une représentation initiale de la structure conceptuelle d'un nouveau domaine, le choix (par l'enseignant) d'un domaine-source approprié joue un rôle crucial, comme le montre l'expérience suivante de Gentner et Gentner (1983), de l'Université de California, San Diego. A un premier groupe d'élèves, ces auteurs présentent le courant électrique comme l'eau coulant dans un tuyau ; une résistance est présentée comme une section rétrécie du tuyau. A un deuxième groupe d'élèves, on présente le courant électrique comme une foule dense circulant dans un couloir ; une résistance est présentée comme une porte à tourniquet. Les auteurs prédisent que les sujets à qui on a présenté l'électricité comme « l'eau dans un tuyau » considèrent le rétrécissement du tuyau comme un obstacle, par conséquent la quantité d'eau diminue avec le nombre d'obstacles. La relation saillante sera « plus d'obstacles, moins d'eau ». Cette relation sera transférée dans le domaine « courant électrique » : le sujet jugera que dans le cas où il y a deux résistances le courant électrique est moins fort que dans le cas où il n'y a qu'une résistance, même lorsque les résistances sont montées en parallèle. Par contre, pour les sujets à qui on a présenté l'électricité comme une « foule dans un couloir », la présence d'un tourniquet a pour effet de ralentir le mouvement de la foule, mais la relation saillante sera « plus d'ouvertures, plus de passage ». Cette relation sera transférée dans le domaine « courant électrique » : le sujet jugera que dans le cas où il y a deux résistances montées en parallèle le courant électrique est plus fort que s'il n'y a qu'une résistance. Les résultats vont dans le sens des prédictions.

Dans le cas où le sujet tente spontanément d'utiliser la solution d'un problème qu'il a déjà résolu pour trouver la réponse à un nouveau problème, cette solution peut être bien ou mal adaptée. Le sujet peut contrôler le degré de cohérence de la solution et, de sa propre initiative, modifier la solution pour la rendre plus adaptée (Escarabajal & Richard, 1986). Il peut aussi appli-

quer cette solution *inadaptée et constater les* résultats négatifs (réponse de l'environnement), ce qui le conduira à modifier la solution engendrée par analogie.

De nombreux résultats expérimentaux obtenus depuis une dizaine d'années, notamment ceux de Holyoak, de l'Université de Michigan et ses nombreux collaborateurs (Bassok, 1990, Holyoak & Thagard, 1989) convergent vers le modèle suivant *du mécanisme d'acquisition des connaissances* par analogie :

Une situation connue est rappelée (la situation *source), ce rappel est conditionné par la façon* dont le sujet se représente la situation actuelle (la situation-cible). Le sujet essaie d'appliquer à la situation-cible le raisonnement qui a été utilisé dans la situation-source. Pour ce faire, il doit établir une correspondance entre les éléments constitutifs des deux représentations qu'il a des deux *problèmes, source et cible. Par exemple, faire cor*respondre la fraction 1/2 à la moitié d'un gâteau. Si cette correspondance est trouvée, le sujet peut appliquer le raisonnement évoqué, soit virtuellement, soit effectivement. Un réaménagement de ce raisonnement peut être tenté s'il s'avère *inadapté (via un contrôle interne ou grâce aux* feed-backs de l'environnement externe). Les deux processus, d'établissement des correspondances entre les représentations source et cible et de réaménagement du raisonnement, ont pour résultat une généralisation des deux représentations (Ross & Kennedy, 1990). *Le sujet dispose désormais d'une situation-source plus générale, donc* adaptée à un plus grand nombre de nouveaux problèmes.

CONCLUSION

Après cette présentation des principaux mécanismes d'apprentissage, *nous allons tenter de proposer quelques éléments de réponse aux ques*tions posées dans l'introduction.

Comment apprend-on *un nouveau domaine de connaissance ? Tous les mécanismes d'acquisi*tion présentés dans la section précédente supposent que le sujet doit être capable de segmenter et agréger les stimuli sensoriels de façon à identifier les informations qu'il manipulera. Cela revient à supposer qu'avant toute entreprise d'apprentis*sage d'un domaine, le sujet doit déjà posséder quelque connaissance (de type déclaratif) du* domaine. La question est alors : comment acquiert-on cette connaissance minimale indispensable pour « démarrer » l'apprentissage d'un domaine dont on ne connaît strictement rien ?

Si l'on admet le postulat fondamental de la psychologie cognitive selon lequel tout objet est appréhendé par une représentation interne qui est une structure de relations, alors le mécanisme-candidat le plus vraisemblable, parmi les méca*nismes connus, pour l'acquisition de la connais*sance minimale initiale est le « transfert analogique ». Ce transfert consiste à emprunter une structure de relations qui est la représentation d'un objet d'un domaine connu pour représenter un objet du nouveau domaine dont on ne connaît *rien. Par exemple, on emprunte la structure de* relations entre les éléments de l'ensemble d'objets « un gâteau, les quarts de gâteau, les moitiés de gâteau... », pour établir des relations entre les objets « 1 », « 1/2 », « 1/4 »... Cet emprunt peut être spontané, plusieurs recherches, notamment *sur l'apprentissage de dispositifs de commande et* sur la compréhension des phénomènes physiques montrent qu'un emprunt est souvent suggéré par les mots mêmes qu'on emploie pour nommer les objets du nouveau domaine. Nous avons trouvé que parmi les gens qui n'ont jamais reçu un ensei*gnement sur l'électricité, ou qui l'ont oublié, beau*coup pensent que l'électricité statique et l'électricité du courant fourni par l'EDF sont de nature différente : « l'électricité statique ne bouge pas, alors que la bonne électricité circule », « ce ne sont pas les mêmes électrons, ça stagne comme *une mare »... (Caillot & Nguyen-Xuan, 1993).*

Comment passe-t-on de l'état de novice à l'état d'expert d'un domaine donné ? Les deux principales différences qu'on trouve entre experts et novices d'un domaine concernent la mémoire des *situations de problème (Egan & Schwarzt, 1979,* Jeffries et al., 1981), et la méthode de raisonnement.

La plus grande capacité de mémoire observée *chez les experts d'un domaine donné n'est pas* due à une supériorité de la mémoire brute, dans le sens que les experts n'ont pas une capacité de mémoire supérieure pour un domaine différent, ou pour des situations étrangères à son expertise. Par exemple, les experts en échec ont une *mémoire très supérieure aux novices lorsqu'il*

s'agit de mémoriser la disposition des pièces sur l'échiquier, mais cette supériorité est observée seulement lorsque la disposition des pièces est « vraisemblable », i.e. elle peut représenter un état d'une vraie partie d'échec. Les experts ne sont pas supérieurs aux novices lorsqu'il faut mémoriser des échiquiers sur lesquels les pièces sont placées au hasard. Les recherches conduites à Carnegie-Mellon à partir de 1973, notamment par Chase et Simon, suggèrent que l'expert a acquis des « chunks » de configurations significatives de pièces, ce qui explique le nombre supérieur de pièces mémorisées par l'expert (Gobet, 1993).

Dans plusieurs domaines, on a montré que les novices ont tendance à chercher la solution d'un problème en conduisant un raisonnement remontant du but aux données du problème, on appelle cette démarche « méthode de recherche rétrospective » ; alors que les experts utilisent plus souvent la « méthode de recherche prospective » : ils conduisent leur raisonnement en partant des données pour aller vers le but (Larkins et al., 1980, Nguyen-Xuan, 1990b). La méthode de recherche prospective a l'avantage d'être cognitivement moins coûteuse, car elle permet de produire les états successifs de la solution (donc de se servir d'une mémoire externe telle que le papier). Mais elle nécessite que le sujet sache exactement dans quelle direction il faut conduire le raisonnement, sous peine de se perdre dans les déductions inutiles. L'expert possède ce savoir parce qu'il a déjà résolu un grand nombre de problèmes et qu'il a construit des connaissances (des heuristiques) lui permettant de conduire son raisonnement en choisissant les directions les plus prometteuses (Patel & Groen, 1986).

Enfin, on peut poser la question de savoir si le fait d'être expert d'un domaine rend-il un individu plus apte à devenir expert d'un autre domaine. La réponse à cette question nécessite qu'on définisse les frontières entre divers domaines de connaissance. Par exemple, l'Anglais et l'Espagnol sont-ils deux domaines de connaissance différents, la distance séparant ces deux langues est-elle plus grande ou plus petite que celle entre l'algèbre et la physique... Le transfert analogique qu'on a vu suggère qu'il y a bien une possibilité de transfert inter-domaine, mais il n'existe pas de recherches au niveau des experts.

Concernant le niveau de débutant, il existe un ensemble de recherches qui se proposent de faire acquérir à l'individu des « connaissances générales » dont on espère qu'elles peuvent s'appliquer ensuite à des domaines spécifiques. Par exemple, on croit que si l'on entraîne les gens à raisonner sur du matériel abstrait, ceux-ci vont acquérir une capacité de raisonnement qui peut s'appliquer à des domaines divers ; car le sujet a travaillé sur des objets abstraits ! Cette orientation de recherche fait l'impasse sur l'acquisition préalable des connaissances déclaratives de chaque domaine spécifique et la construction active des connaissances procédurales par la résolution des problèmes du domaine. Elle n'a d'ailleurs pas donné de résultats probants (Chartier et al., 1995). Des résultats modestes mais encourageants ont été obtenus dans des recherches à objectifs plus précis pour chercher, par exemple, si et comment, l'apprentissage de certains langages de programmation fait progresser les habiletés cognitives telles que la décomposition d'un problème en sous-buts, la détection d'incohérences dans un mode d'emploi (Klahr & Mc Coy Carver, 1988, Gurtner & Retschitzki, 1991). Enfin, nous mentionnerions une nouvelle direction de recherche, peut-être plus prometteuse, fondée sur l'idée que les habiletés générales transférables d'un domaine à un autre concernent plutôt des « attitudes cognitives », telles que l'habitude d'analyser son propre fonctionnement cognitif, l'habitude de chercher des analogies quand on cherche à comprendre ou à résoudre des problèmes (Brown & Kane, 1988).

Anh Nguyen-Xuan
Université de Paris 8

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON, J.R. (1983). – « Acquisition of proof skills in geometry ». In R.S. Michalski, J.G. Carbonell, T.M. Mitchell (Eds), **Machine learning,** vol.1. Palo Alto, Ca. : Tioga.

BASSOK, M. (1990). – Transfer of domain-specific problem-solving procedures. **Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition,** 16, 522-533.

BROWN, A., KANE, M.J. (1988). – Preschool children can learn to transfer : learning to learn and learning from example. **Cognitive Psychology,** 20, 493-523.

BRUNER, J.S., GOODNOW, J., AUSTIN, G. (1956). – **A study of thinking.** New York : Wiley.

CAILLOT, M. & NGUYEN-XUAN, A. (1993). – « Adults'understanding of electricity ». In M. Caillot (Ed.). **Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology**. NATO ASI Series : Computer and Systems Sciences, vol. 115. Berlin : Pringer Verlag.

CHARTIER, D., HUTEAU, M., LAUTREY, J., LOARER, E. (1995). – **Peut-on éduquer l'intelligence ?** Berne : Peter Lang.

EGAN, D., SCHWARZT, B. (1979). – Chunking in recall of symbolic drawings. **Memory and Cognition,** 17, 147-158.

ESCARABAJAL, M. C., RICHARD, J. F. (1986). – Le transfert analogique de procédures dans l'interprétation et la résolution d'un problème d'inclusion de classes chez des adultes. **Archives de Psychologies,** 54, 39-64.

ESTES, W.K. (1985). – « Some common aspects of models for learning and memory in lower animals and man ». In L.G. Nilsson & T. Archer (Eds.), **Perspective on learning and memory.** New York : Lawrence Erlbaum Associates.

GENTNER, D., GENTNER, D. R. (1983). – « Flowing waters or teeming crowds : mental model of electricity ». In D. Gentner et A. Stevens (Eds.), **Mental Models.** Hillsdale, N.J. : Lawrence Earlbaum Associates.

GLUCK, M.A., BOWER, G.H. (1988). – Evaluating an adaptative network model of human learning. **Journal of memory and Language,** 27.

GOBET, F. (1993). – **Les mémoires d'un joueur d'échecs.** Fribourg : Editions Universitaires.

GOSWAMI, U. (1990). – Analogical reasoning : what develop ? A review of research and theories. **Child Development,** 62, 1-22.

GURTNER, J.L., RETSCHITZKI, J. (1991). – **LOGO et apprentissage**. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

HOLYOAK, K., THAGARD, P.R. (1989). – « A computational model of analogical problem solving ». In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), **Similarity and analogical reasoning.** Cambridge : University Press.

JEFFRIES, R., TURNER, A.A., POLSON, P.G., ATWOOD, M.E. (1981). – « The processes involved in designing sofware ». In J.R. Anderson (Ed.), **Cognitive skills and their acquisition.** Hillsdale, NJ : Erlbaum.

KLAHR, D., MC COY CARVER, S. (1988). – Cognitive objectives in LOGO debugging curriculum : instruction, learning and transfer. **Cognitive Psychology,** 20, 362-404.

LAMBERTS, K. (1990). – A hybrid model of learning to solve physics problems. **European Journal of Cognitive Psychology,** 2, 151-170

LARKINS, J., MC DERMOTT, J., SIMON, D., SIMON, H.A. (1980). – Expert and novice performance in solving physics problems. **Science,** 208, 1335-1342.

LEVINE, M. (1975). – **A cognitive theory of learning : Research on hypothesis testing.** New York : Lawrence Erlbaum Associates.

MATHEWS, R.C., BUSS, R.R., STANLEY, W.B., BLANCHARD-FIELDS, F., CHO, J.R., DRUHAN, B.D. (1989). – Role of implicit and explicit processes in learning from examples : a synergistic effect. **Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition,** 15, 1083-1100.

MILLER, G.A., GALANTER, E., PRIBAM, K.H. (1960). – **Plans and the structure of behavior.** New York : Holt, Rinhart and Winston.

NEWELL, A., SIMON, H.A. (1972). – **Human problem-solving.** Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall.

NGUYEN-XUAN, A. (1990a). – « Le raisonnement par analogie ». In J.F. Richard (Ed), **Traité de Psychologie Cognitive : Traitement de l'Information Symbolique,** vol. 2. Paris : Dunod.

NGUYEN-XUAN, A. (1990b). – « Deductive reasoning in geometry : search strategies and surface features ». In H. Mandl, E. De Corte, N.S. Bennett, H. Friedrich (eds), **Learning and Instruction : European research.** Oxford, Pergammon Press.

NGUYEN-XUAN, A. (1991). – « Effects of prior knowledge on learning to use a command device ». In A. Oliveira (Ed.), **Structures of communication and intelligent help for hypermedia courseware.** Springer Verlag.

NGUYEN-XUAN, A., GRUMBACH, A. (1988). – « Modèles informatiques de processus d'acquisition ». In J.P. Caverni, C. Bastien, P. Mendelsohn & G. Tiberghien (Eds), **Psychologie Cognitive : modèles et méthodes**. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.

NOSOFSKY, R.M. (1984). – Choice similarity and the context theory of classification. **Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition,** 10, 104-114.

PATEL, V.L., GROEN, G. (*1986*). – Knowledge-based solution strategies in medical reasoning. **Cognitive Science,** 10, 91-116.

ROSS., B.H., KENNEDY, P.T. (1990). – Generalizing from the use of earlier examples in problem solving. **Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition,** 16, 42-55.

SINGLEY, M.K., ANDERSON, J.R. (1989). – **The transfer of cognitive skills.** Cambridge, Massachusett : Harvard University Press.

SMITH, J.D., SHAPIRO, J.H. (1989). – The occurrence of holistic categorization. **Journal of Memory and Language,** 28, 386-399.

WARD, T.B., VELA, E., HASS, S.D. (1990). – Children and adults learn family-resemblance categories analytically. **Child Development,** 61, 593-605.